

溶鋼流動解析によるモールド湯面レベル制御モデルの構築

Formulation of a Mold Level Control Model by Molten Steel Flow Analysis Method

鈴木 大^{*(1)}
Dai SUZUKI

抄 録

プロセス現象の解明・評価から制御系設計までの一貫したプロセス制御ソリューション業務の事例として、連続鋳造プロセスにおけるモールド湯面レベル制御への取り組みについて紹介する。まず、モールド内の溶鋼流動を流体解析技術により定量評価することで、モールド湯面レベル制御モデルを構築した。本モデルでは溶鋼流動解析によってモールド内の溶鋼流動と湯面を計算しながら、同時に制御系解析を行う。これによって溶鋼流動の乱れを考慮した現実的なモールド湯面レベル制御のシミュレーションが可能となり、高速鋳造におけるモールド湯面レベル制御を正確に予測・評価することができる。

Abstract

This paper presents an activity on mold level control in continuous casting process as a case example of our process control solution business, in which we clarify and evaluate the process phenomena and design the control system. For a start, a mold level control model has been formulated by fluid flow analysis technique that evaluates molten steel flow in the mold quantitatively. The model calculates the fluid flow and free surface in the mold by molten steel flow analysis method, while control system analysis is performed simultaneously. It enables realistic simulation of the mold level control system considering the fluid flow turbulence. As a consequence, mold level control in high-speed casting can be predicted and evaluated with high accuracy.

1. はじめに

モールド湯面レベル制御とは、連続鋳造設備のモールド内の溶鋼湯面レベルを一定に保持するプロセス制御であり、製品品質の歩留まりに極めて大きな影響力をもつ。モールド湯面レベルの変動量と製品きず発生率は非常に相関が高く、これはレベル変動が大きくなると溶鋼面上のパウダーなどの不純物が巻き込まれ、圧延時に鋼板表面きずとして露出するものと見られている。そのため、モールド湯面レベル制御はモールド湯面レベルの変動量をなるべく小さく抑えるように設計される。

モールド湯面レベルの動特性は大まかに言って単純な積分特性であり、従来のモールド湯面レベル制御技術の開発においてはこの積分特性を前提とした効果の予測が行われてきた。しかし、実際には鋳造速度の高速化にともない溶鋼流動の乱れが波立ちとして湯面に顕在化する。そのため、従来の粗いモデルでは信頼できるシミュレーション結果を得ることが難しく、高速鋳造におけるモールド湯面レベル制御の制御性能を正確に予測・評価することができない。

そこで筆者は溶鋼流動解析によりモールド湯面レベル制御モデルを構築することにした。図1にそのブロック線図を示す。本モデルの特徴は、モールド内の溶鋼流動と湯面の動特性を溶鋼流動解析で

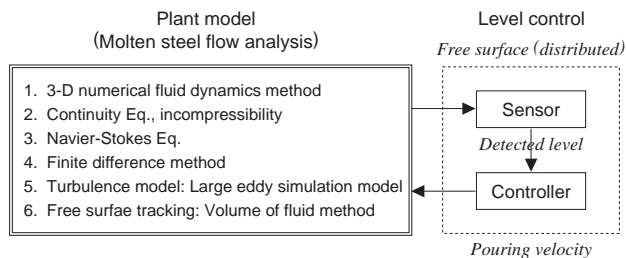


図1 溶鋼流動解析によるモールド湯面レベル制御モデル

記述し、制御系解析と連成する点にある。これによって溶鋼流動の乱れを考慮したモールド湯面レベル制御シミュレーションが可能となり、高速鋳造におけるモールド湯面レベル制御を正確に予測・評価することができる。

2. 連続鋳造プロセス

モールド湯面レベル制御モデルを議論する前に、背景となる連続鋳造設備とモールド湯面レベル制御について簡単に説明する。

2.1 連続鋳造設備

連続鋳造設備は転炉などにより精錬された溶鋼を連続的に凝固さ

^{*(1)} 環境・プロセス研究開発センター システム制御技術部
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL(0439)80-2481

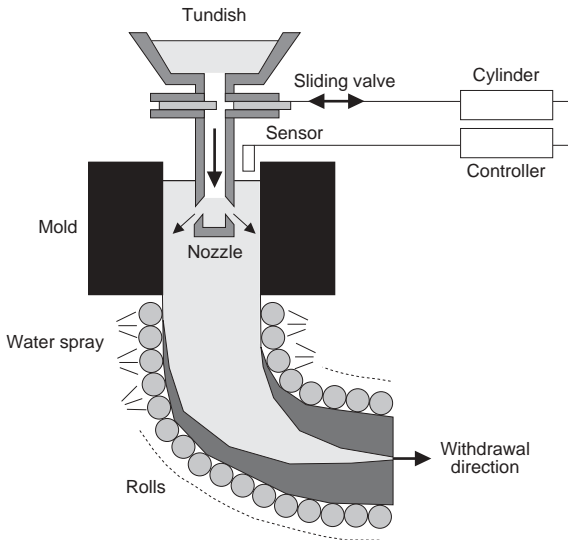


図2 連続鋳造プロセスにおけるモールド湯面レベル制御

せ、次圧延工程用の鋼片を効率的に製造するものである。レードルから出た溶鋼はタンディッシュに一時的に蓄えられ、浸漬ノズルを通じて水冷された銅板で囲まれたモールドに注入される。モールド部分で表層部が凝固され、更に二次冷却帯にて内部まで完全に凝固されたのち、切断機で所定の長さに切断される。連続鋳造設備の概要を図2に示す。

2.2 モールド湯面レベル制御

図2に示すようにモールド湯面レベルはセンサーで常時検出され、目標レベルとの偏差がコントローラーにフィードバックされる。コントローラーの出力によってシリンダーが駆動され、スライディングノズルの開度を調整する。これによってモールドへの溶鋼注入量を制御し、モールド湯面レベルは目標レベルに追従することになる。

ところで湯面レベル変動の要因には、注入系外乱と引抜き系外乱がある。注入系外乱とは非金属介在物でノズルが閉塞することによって生じる流量特性の変化である。引抜き系外乱とは水冷帯で発生するバルジング(鋳片の熱変形)によって生じる周期的な湯面レベル変動のことをいう。

3. モールド湯面レベル制御モデル

モールド湯面レベル制御モデルについて説明する。ブロック線図は既に図1に示してあるが、ここではプロセスの動特性を表す物理モデルの構成方程式に焦点を当てることにする。そして、従来使用されている積分特性モデルと新たに構築した溶鋼流動解析モデルを比較し、その違いを明確にする。

3.1 積分特性モデル

積分特性モデルでは流入量と流出量の静的な体積収支だけを考慮しており、モールド内湯面レベルの動特性が単純な積分特性で表されると仮定している。このとき、モールド内湯面レベルの支配方程式は次に示す線形の常微分方程式で与えられる。

$$h = \frac{1}{A} \int (V_{in} - V_{out}) dt \quad (1)$$

ただし、 h : モールド湯面レベル(m)、 A : モールド断面積(m²)、 V_{in} : 流入体積速度(m³/s)、 V_{out} : 流出体積速度(m³/s)、 t : 時間(s)を

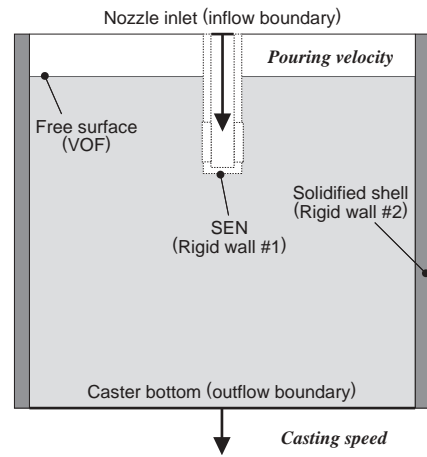


図3 溶鋼流動解析モデルの境界条件

表す。式(1)はモールド湯面レベルが溶鋼体積に比例することを表しており、溶鋼流動の乱れが湯面に殆ど表れない場合にはよい近似となる。しかし、溶鋼流動の乱れが波立ちとして湯面に顕在化する高速鋳造においてはこの限りではない。このような場合には次に説明する溶鋼流動解析モデルが必要となる。

3.2 溶鋼流動解析モデル

溶鋼流動解析モデルは流体力学的手法に基づいており、溶鋼流動の乱れを考慮したモールド内湯面の動特性を正確に記述する。このとき、モールド内溶鋼流動は自由表面を持つ非圧縮性流体の三次元乱流として扱うことができ、その支配方程式は以下に示す非線形の偏微分方程式で与えられる。

$$0 = \nabla \cdot u \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu_e \nabla^2 u + g + F \quad (3)$$

式(2)は連続の式、式(3)は運動量保存式であり、 u : 溶鋼流速(m/s)、 ρ : 溶鋼密度(kg/m³)、 P : 圧力(N/m²)、 ν_e : 実効動粘性(m²/s)、 g : 重力加速度(m/s²)、 F : 外力項(m/s²)を表す。乱流モデルにはLES (Large Eddy Simulation) モデルを利用するとして、乱流の乱れ、すなわち時間変化を表現できるようにする。また、自由表面の界面位置はVOF法 (Volume Of Fluid method) により定義する。

これらの方程式を差分法で離散化し、反復解法により数値的に解くことで溶鋼流速と自由表面の時間変化を計算することができる。溶鋼流動解析モデルの境界条件を図3に示す。

以上によって、モールド内溶鋼流動と湯面全体の動特性を的確に表現する物理モデルが構築される。このモデルは高速鋳造における湯面の動特性を正確に表現できる。

4. モールド湯面レベル制御シミュレーション

以下、溶鋼流動解析に基づくモールド湯面レベル制御モデルの有用性をシミュレーションの結果を用いて説明する。ここでは比較のため、積分特性モデルによる結果についても示す。表1に解析条件を示す。ここでは溶鋼流動の乱れの湯面レベル制御への影響を予測

表1 モールド湯面レベル制御シミュレーションの解析条件

Mold width	Mold thickness	Casting speed	Reference level	Control method
1500mm	240mm	2.1mpm	-5mm	PI

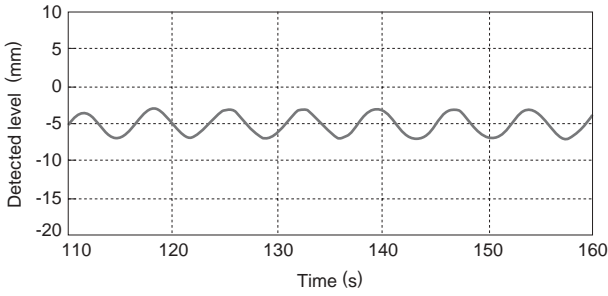


図4 積分特性モデルで計算された検出湯面レベル

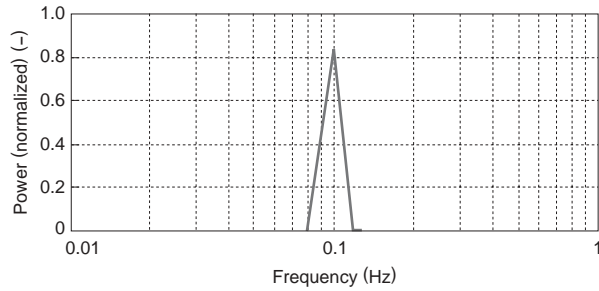


図5 積分特性モデルで計算された検出湯面レベルの周波数特性

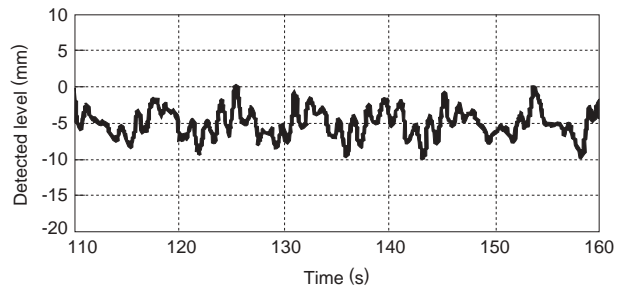


図6 溶鋼流動解析モデルで計算された検出湯面レベル

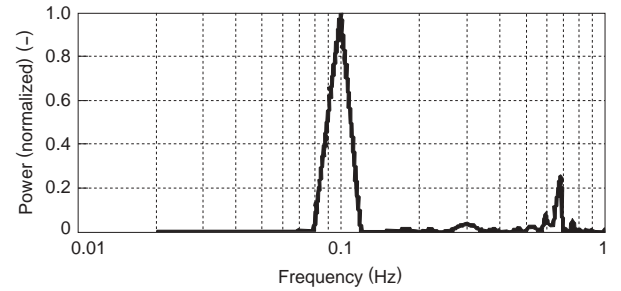


図7 溶鋼流動解析モデルで計算された検出湯面レベルの周波数特性

するため、スラブ高速鋳造を対象に解析を実施した。外乱としてはバルジングを仮定して、10秒周期 (= 周波数0.10Hz) の湯面レベル変動を発生させた。そして、センサーで湯面レベルを検出し、PI制御による溶鋼注入量の制御を行った。

4.1 積分特性モデル

図4に積分特性モデルによるシミュレーションで計算された検出湯面レベル時系列を示す。また、図5にそのパワースペクトラムを示す。積分特性モデルでは与えられた外乱に起因する0.10Hzの湯面レベル変動だけが検出されていることが分かる。

4.2 溶鋼流動解析モデル

図6に溶鋼流動解析モデルによるシミュレーションで計算された検出湯面レベル時系列を示す。また、図7にそのパワースペクトラムを示す。溶鋼流動解析モデルでは0.10Hzの湯面レベル変動だけではなく、約0.70Hzの高周波の湯面レベル変動も検出されていることが分かる。この0.70Hzの湯面レベル変動はモールド内に発生する定在波の表れと考えられる。このとき、定在波の周波数は次に示す理論式から計算される。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{N\pi g}{L}} \quad (4)$$

ただし、 f : 周波数 (Hz), N : 整数値 (-), g : 重力加速度 (m/s^2), L : モールド幅 (m)である。ここで $N = 1$, $L = 1.500m$ を式(4)に代入すると $f = 0.71Hz$ となり、溶鋼流動解析モデルで計算された波立ちの周波数とほぼ一致する。

このような高周波の波立ちは実プロセスにおいても発生しており、溶鋼流動解析モデルが湯面の動特性を正確に再現していることが分かる。図8に実プロセスの湯面レベルチャートを示す。ここでは約1.00Hzの波立ちが検出されていることが読み取れる。

溶鋼流動解析モデルは検出湯面レベルだけではなく、モールド内に分布する湯面全体を評価することもできる。湯面レベル平均値と標準偏差の分布をそれぞれ図9と図10に示す。白から黒に向かって大きな値を持つ。単位はmmである。図10において白くなっている

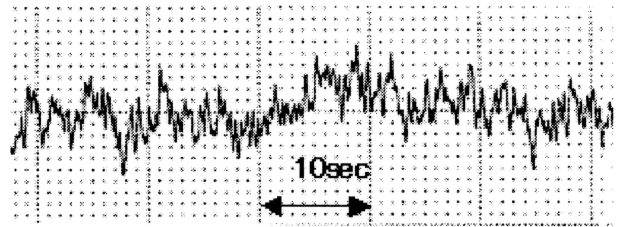


図8 実プロセスの湯面レベルチャート

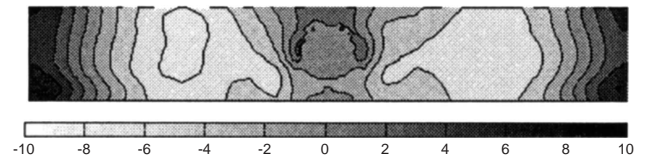


図9 モールド内の湯面レベル平均値(解析)

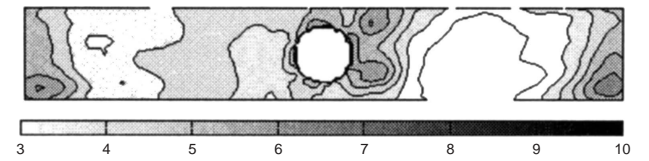


図10 モールド内の湯面レベル標準偏差(解析)

部分がセンサーにより湯面レベルが検出・制御された場所であり、その周辺のレベル変動は十分に抑制されていることが分かる。しかし、その他の領域における湯面のレベル変動は抑制されておらず、特にセンサーで検出・制御していない反対側のレベル変動が大きくなっている。この結果から、モールド湯面レベル制御により局所的なレベル変動だけが抑制されることが分かる。

ところでモールド両短辺と浸漬ノズル周辺の湯面が盛り上がり、大きく変動している。これは鋳型内溶鋼流動の表れであると考えられる。図11にモールド厚み中心における溶鋼時間平均流速ベクトル分布を示す。ノズル吐出流が短辺に衝突し、モールド上方に強い循

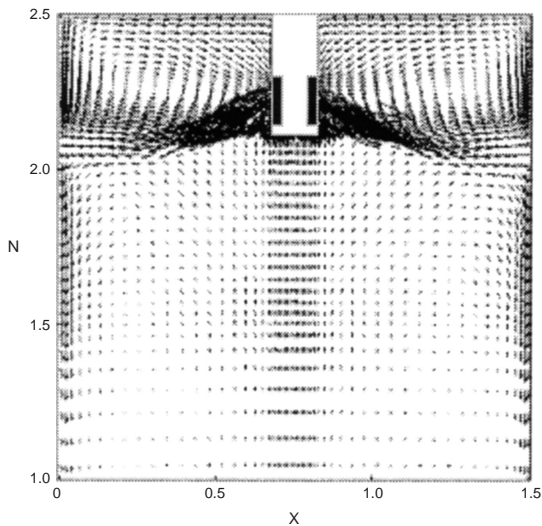


図11 モールド厚中央における時間平均溶鋼流速分布(解析)

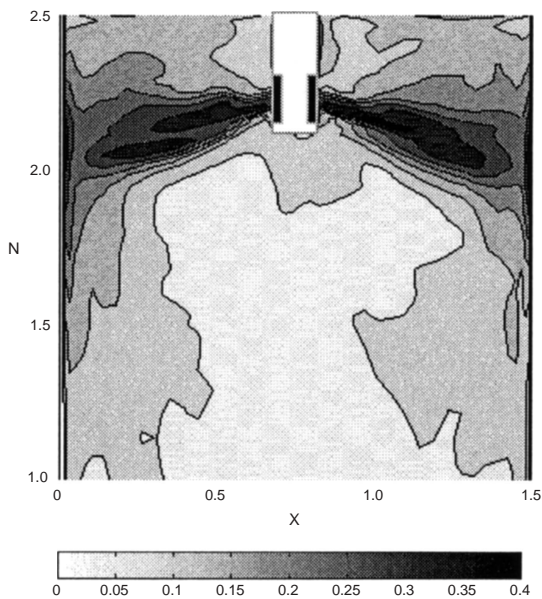


図12 モールド厚中央における溶鋼流速標準偏差分布(解析)

環流が形成されている。このとき、短辺壁面に沿って湯面上昇する強い流れが短辺近傍の湯面を持ち上げることが分かる。また、ノズル周辺は循環流が衝突する位置になるため、湯面が盛り上がり、変動も大きくなる。

また、図12にはモールド厚み中心における溶鋼流速標準偏差分布を示す。白から黒に向かって大きな値を持つ。単位はm/sである。ノズル吐出流の乱れによってモールド内溶鋼全体が大きく乱れていることが分かる。こうした乱流の乱れは溶鋼流速が速くなるほど顕著になり、上湯面の波立ちとして表れると考えられる。

以上より、溶鋼流動解析モデルを用いることによって溶鋼流動の乱れを考慮した現実的なモールド湯面レベル制御シミュレーションが可能となることが示された。

5. おわりに

溶鋼流動解析によるモールド湯面レベル制御モデルを構築した。これにより溶鋼流動の乱れを考慮した現実的なモールド湯面レベル制御シミュレーションが可能となった。また、その有効性をシミュレーションにより確認することができた。今後は、本モデルを用いて高速鋳造におけるモールド湯面レベル制御の設計と評価を進めていく。

参考文献

- 1) Suzuki, D. et al. : Level Control Model by Numerical Fluid Dynamics Method. Proceedings of the Fourth International Conference on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials. IPMM'03. 2003(CD-ROM)